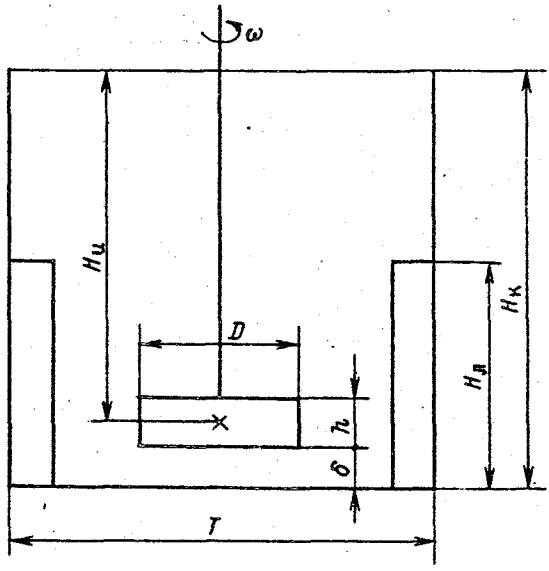
Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. LXXXVII, 1981 г.

УДК 622.765

ПОДОБИЕ ФЛОТАЦИОННЫХ МАШИН ПРИ ИХ МОДЕЛИРОВАНИИ

В.В.ДЕНЕГИН



Геометрические характеристики камеры флотационной машины
$H_К$ – высота камеры; $H_Л$ – высота лопаток; $H_И$ – глубина погружения импеллера; T – ширина камеры; D – диаметр импеллера; h – толщина импеллера; δ – осевой зазор; ω – угловая скорость импеллера

В литературе, посвященной теории флотации, большое внимание уделяется математическому моделированию кинетики процесса флотации [1, 7, 9]. Для камерных механических машин непрерывного действия К.Ф.Белоглазовым [9] предложено следующее уравнение кинетики флотации:

$$\varepsilon = 1 - e^{-k\tau}, \qquad (1)$$

где ε – извлечение флотируемых материалов; τ – время флотации.

Хотя скорость флотации минералов зависит непосредственно от гидродинамики потоков в камере флотомашины, в уравнение (1) гидродинамические характеристики не входят. Между тем детальный анализ гидродинамики камеры флотомашины, а следовательно, и применение методов подобия к флотационному процессу являются наиболее общими и обещающими при решении инженерных и конструкторских задач.

Для обеспечения геометрического подобия двух флотационных машин одного типа достаточно удовлетворить условию (см.рисунок)

$$\frac{H_К}{H'_К}=\frac{T}{T'}=\frac{D}{D'}=\frac{H_И}{H'_И}=\frac{h}{h'}=\frac{\delta}{\delta'}=\frac{H_Л}{H'_Л}=const. \qquad (2)$$

Для выполнения условий динамического подобия можно потребовать, чтобы для двух камер удельные затраты энергии на единицу объема камеры были одинаковыми:

$$q=A/V=const. \qquad (3)$$

Из выражений (2) и (3) получаем, что скорость $v_И = v'_И$. В практике проектирования отечественных и зарубежных машин это равенство выполняется.

Подобный подход к вопросам моделирования является слишком упрощенным и не учитывает ряда существенных для ведения процеса флотации обстоятельств. Так, в полученные уравнения не входят аэрационные характеристики машины, расходные парамеры по пульпе, потребляемая мощность, гидродинамические параметры.

Первые работы по гидродинамическому моделированию флотомашин в нашей стране были выполнены С.И.Митрофановым, который предложил снимать полные характеристики моделей машин, подобные характеристикам центробежных насосов, и на их основе определять размерные параметры промышленных машин. Им предложен ряд соотношений между расходом пульповоздушной смеси, числом оборотов, диаметром импеллера и высотой уровня пульпы в камере [4, 5]. Исследования по моделированию флотационных машин были продолжены И.Ф.Кашкаровым [3], который вывел уравнения для моделирования импеллеров, включающие только геометрические параметры камеры.

Большое влияние на работу флотомашины оказывает аэрированность пульпы в камере. При этом важными являются и степень дисперсности воздушной фазы, и равномерность ее распределения по объему камеры. В настоящее время еще не удалось получить в промышленных установках однородной аэрированности всего объема камеры флотомашины. Вместе с тем, исследования аэрационных характеристик в камере механической флотационной машины, выполненные в ЛГИ [2], показали, что весь объем камеры можно разбить на несколько зон, внутри которых распределение воздушной фазы практически однородно.

На процесс флотации оказывает влияние большое число факторов, учесть которые не представляется возможным. Однако используя метод анализа размерностей, можно выявить наиболее важные факторы. Так, применяя π-теорему к флотационной системе, получим следующие критерии подобия, каждый из которых имеет определенный физический смысл [8]:

$$Re=\frac{\rho\omega D^2}{\mu};\quad We=\frac{\rho\omega^2D^3}{\sigma};\quad Fr=\frac{\omega^2D}{g};\quad K_N=\frac{N}{\rho\omega^3D^5};$$
$$K_P=\frac{P}{\omega D^3};\quad K_Q=\frac{Q}{\omega D^3};\quad K_1=\frac{H_К}{D};\quad K_2=\frac{T}{D};\quad K_3=\frac{\delta}{D}, \qquad (4)$$

где Re, We, Fr - критерии Рейнольдса, Вебера, Фруда; ρ - плотность среды; μ - коэффициент кинематической вязкости; σ - коэффициент поверхностного натяжения; g - ускорение свободного падения; K_N - критерий мощности; N - мощность; K_P, K_Q - критерии потоков по пульпе и возду-

ху; P - объемный расход пульпы; Q - объемный расход воздуха; $K_1 K_2, K_3$ - критерии геометрического подобия; H_K, T, δ - геометрические параметры (см.рисунок).

В камере флотационной машины, как в перемешивающем аппарате, имеет место интенсивный массоперенос, который может характеризоваться коэффициентом диффузии D_v. Тогда к критериям (4) добавится еще один - критерий Шмидта

$$Sc = \mu/\rho D_v . \qquad (5)$$

К.Баркер и Р.Трейбал определили [I6], что в полностью стабилизированных баках при условии хорошо развитой турбулентности критерием Шмидта можно пренебречь. С другой стороны, рядом исследований доказано [I3, I4, 2I], что в импеллерной машине турбулентность может считаться совершенной (число Рейнольдса превосходит значение 10^6). В большинстве случаев при рассмотрении процесса флотации критерием Шмидта пренебрегают.

Если условиться рассматривать только геометрически подобные системы, то функциональная зависимость между безразмерными критериями подобия выразится в следующем виде:

$$K_N = f(Re, Fr, We) . \qquad (6)$$

Теоретически возможно удовлетворить двум из трех критериев, подбирая жидкости с различными физическими свойствами и принимая для разных систем различные скорости импеллеров. Из-за специфики флотационного процесса один из критериев должен быть определяющим. В этом вопросе у специалистов, однако, нет единого мнения. И.Чи и Е.Янг показали [I7], что определяющим фактором при моделировании кондиционеров может являться критерий Фруда. Н.Арбайтер и другие [I5] при моделировании флотационных машин за основной параметр приняли критерий потока K_Q, мотивируя это тем, что он влияет на взвешивающую способность частиц минерала. В другой работе [I2] эти же авторы предложили в качестве базового - критерий мощности, который широко используется специалистами в области химической технологии применительно к различным мешалкам.

Работы, посвященные процессам, происходящим в мешалках, и моделированию перемешивающих аппаратов, - весьма многочисленны, но результаты их в чистом виде не могут быть перенесены на флотационные машины. Это связано с наличием в последних трехфазной системы, представляющей для исследователей пока непреодолимые трудности как в теоретическом, так и в экспериментальном планах. Кроме того, рассматривать реальные процессы, происходящие в камере флотомашины, не принимая во внимание особенностей турбулентности, - невозможно.

По Л.Прандтлю [6], настоящая турбулентность возникает тогда, когда, например, вследствие начальных возмущений в потоке образуются такие распределения скоростей, которые, подобно поверхности раздела, неустойчивы и приводят к появлению многих маленьких вихрей. В турбулентном течении на главное движение налагается неправильное пульсационное движение, в результате чего и возникает перемешивание отдельных частей жидкости. Хотя, как

отмечал Г.Шлихтинг [II], в канале пульсации скорости составляют всего несколько процентов от средней скорости течения, они имеют исключительное значение для развития всего процесса. Действие пульсационного движения на осредненное проявляется как бы в увеличении вязкости осредненного движения.

Таким образом, турбулентный режим характеризуется следующими особенностями: I) траектории элементарных жидких объемов имеют неупорядоченный, хаотический характер; 2) в фиксированных точках пространства скорость жидкости неупорядоченно изменяется во времени по величине и направлению; 3) наблюдается интенсивный перенос массы, тепла и импульса.

Как известно, турбулентный поток представляет собой суперпозицию вихрей разных размеров [IO]. Крупномасштабные вихри получают энергию от источника, генерирующего турбулентность. Постепенно эти вихри делятся на более мелкие, а энергия последних диссипируется в виде тепла посредством трения.

Итак, сравнивать различные машины можно довольно точно по перемешивающей способности камеры в целом, если удастся измерить характеристики турбулентности в сравниваемых камерах. Именно таким путем можно предсказать технологические результаты процесса флотации в промышленных машинах, производя эксперименты на малых модельных образцах.

Турбулентность можно характеризовать различным образом рядом характеристик [IO], например, средней скоростью потока $\bar{u}$, интенсивностью турбулентности ε, временной $a(t)$, пространственной S и поперечной C корреляциями, микро- и макромасштабами турбулентности (соответственно λ и Λ) и некоторыми другими.

Полное изучение характеристик турбулентности требует применения дорогостоящего оборудования. Необходимо иметь в виду и то, что использование измерительной техники ограничено присутствием в камере флотационной машины пузырьков воздуха, частиц твердого, непрозрачностью пульпы и стенок камеры. Неудивительно поэтому, что вопросы применимости теории турбулентности в флотационном процессе носят скорее качественный, нежели количественный характер.

В этой связи представляют интерес работы Х.Шуберта [20] и Т.Майка и Д.Эвростенау [I8]. По мнению этих авторов, турбулентность во флотации может быть процессоопределяющей. Дискретные частицы, присутствующие в турбулентном потоке, подвергаются следующим турбулентным микропроцессам: транспортированию (переносу), диспергированию агрегатов, столкновению. К этому еще добавляется процесс турбулентного разрушения агрегатов частиц, что при ведении флотации может играть существенную роль. Турбулентная диспергация воздушной фазы также сильно влияет на процесс флотации. Образующиеся в камере агрегаты частица – пузырек подвергаются диспергирующему эффекту турбулентных потоков, поэтому только наиболее стабильные агрегаты могут быть затем удалены с пеной.

Таковы современные представления о роли турбулентности в процессе флотации. Более детальные теоретические исследования не были пока осуществлены ввиду больших математических трудностей. Корректно поставленный

эксперимент мог бы существенно помочь исследователям, однако и здесь имеются серьезные препятствия. Так, воздушная фаза, присутствующая в камере флотомашины, влияет на плотность и вязкость среды, на осредненные и пульсационные составляющие скорости потоков, на энергетические и другие характеристики машины. Кроме того, наличие в камере крупных воздушных пузырьков делает невозможным применение при экспериментальных исследованиях такой совершенной техники, как лазерная анемометрия, которая вполне приемлема для измерения турбулентных характеристик в системах жидкое - жидкое и даже жидкое - твердое.

Все же те немногочисленные исследования, которые были проведены, позволяют сделать следующие важные выводы относительно механических флотационных машин: I) в камере промышленных машин имеет место хорошо развитая турбулентность; 2) процесс в камере машины является квазистационарным. Последнее обстоятельство значительно упрощает процедуру измерений. С другой стороны, как показали наши эксперименты, турбулентность в некоторых зонах камеры не может считаться изотропной.

Основной трудностью, с которой сталкиваются исследователи, является непостоянство плотности среды, меняющейся как во времени, так и в пространстве. Известно, что в случае газожидкостной системы эффективная плотность ρ определяется величиной газосодержания ξ, которая, в свою очередь, зависит не только от объемного расхода воздуха через импеллер в единицу времени, но и от картины течений в камере. Кроме того, ξ само влияет на скоростную структуру потоков в камере.

Таким образом, в настоящее время как теоретические, так и экспериментальные исследования гидродинамики флотомашин и турбулентности в камере машины связаны с непреодолимыми трудностями, однако это не означает, что проблему моделирования флотомашин решить невозможно.

Существует два основных направления в этой области. Первое, связанное с попытками получить базовый критерий подобия на основе анализа размерностей, развивается давно. Другим направлением, начавшем развиваться сравнительно недавно, является изучение турбулентности в камере машины и ее эффектов. Основная идея заключается в концепции массопереноса, характеризуемого коэффициентом диффузии D_v. Эта величина определяется [I9] пульсациями скорости u' и макромасштабом Λ :

$$D_v = \Lambda\sqrt{(\bar{u}')^2} .$$

Так как u' варьирует внутри объема камеры, то и D_v будет меняться в зависимости от местонахождения исследуемого объема, поэтому разумно принимать в расчетах интегральную величину

$$\Delta = \frac{1}{V}\int_V \sqrt{(\bar{u}_i')^2}\,\Lambda dV ,$$

где u_i' - пульсация скорости для элементарного объема V_i, в котором u_i' может считаться постоянной.

Согласно теории турбулентности, диаметр образующихся пузырьков воздуха пропорционален размеру крупномасштабных турбулентных вихрей или макромасштабу турбулентности Λ. Это означает, что Δ определяет дисперс-

ность воздушной фазы. Кроме того, D_v зависит от диссипации энергии в единице объема камеры, следовательно, критерий Шмидта может являться критерием динамического подобия, если вместо D_v воспользоваться величиной Δ и модифицировать критерий Шмидта Sc^* в виде

$$Sc^* = \mu / \rho \Delta .$$

Этот критерий может использоваться для сравнения не только однотипных флотомашин различных размеров, но и машин разных типов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богданов О.С., Поднек А.К., Хайнман В.Я. и др. Вопросы теории и технологии флотации. – Тр. ин-та Механобр, 1959, вып. 124.

2. Денегин В.В., Денегина Н.Н. Методика и результаты экспериментальных исследований газосодержания в камере механической флотационной машины. – Зап. ЛГИ, 1975, т.69, вып.1.

3. Кашкаров И.Ф. Методика испытаний и некоторые результаты исследования работы механических флотационных машин. – Цветные металлы, 1956, № 2.

4. Митрофанов С.И. К вопросу теории и расчета механических флотационных машин. – Цветные металлы, 1939, № 9.

5. Митрофанов С.И. Об „одной теории расчета флотационных машин". – Цветные металлы, 1940, № 7.

6. Прандтль Л. Гидромеханика. М., ИЛ, 1949.

7. Ребиндер П.А. Физико-химия флотационных процессов. М., Металлургиздат, 1933.

8. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М., Наука, 1967.

9. Справочник по обогащению руд. М., Недра, 1974, т. 2.

10. Хинце И.О. Турбулентность. М., Физматгиз, 1963.

11. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М., Наука, 1974.

12. Arbiter N., Harris C.C. Power requirements and scale-up in flotation, Nature, 1961.

13. Arbiter N., Harris C.C. Flotation machines, AIME, N.Y., 1962.

14. Arbiter N., Steininger J. Hydrodynamics of flotation machines, 6th Jnt.Miner.Proc.Congr., Cannes, 1963.

15. Arbiter N., Harris C.C., Yap R. 8th Jnt. Miner.Proc.Congr. Inst.Mekhanobre, Leningrad, Pr.D-19, 1968.

16. Barker J.J., Treybal R.E. AIChE Journal, 1960, vol.6.

17. Chi J.M.H., Joung E.F. Trans.Inst.Min.s Met, 1963, vol.72.

18. Mika T.S., Fuerstenau D.W. 8th Jnt.Miner. Proc.Congress. Inst.Mekhanobre, Leningrad, Pr.S-4, 1968.

19. Shubert H. 8th Jnt.Miner.Proc.Congress, Inst.Mekhanobre, Leningrad, 1968, vol.1.

20. Shubert H. Aufbereitungs Technik. 1974, N 9.

21. Steininger J. Hydrodynamics of Flotation machines. Doc.Dis.Col.Univ., 1962.